植 物 分 类 与 资 源 学 报　2011, **33** (3): 335～349
Plant Diversity and Resources　DOI: 10.3724/SP.J.1143.2011.10187

气候变化对 7 种乔木植物分布的潜在影响*

吴建国
(中国环境科学研究院，北京　100012)

摘要：利用 CART (classification and regression tree，分类和回归树) 生态位模型，采用 A2 和 B2 气候情景，分析了气候变化对秦岭冷杉、祁连圆柏、楠木、麦吊云杉、马尾树、领春木和连香树分布范围及空间格局的影响。结果显示：气候变化下，这些植物目前适宜分布范围呈现缩小趋势；新适宜及总适宜分布范围，连香树、马尾树、楠木和祁连圆柏呈现减少趋势，秦岭冷杉在 1991-2020 年及 2021-2050 年时段呈现减少趋势，之后增加，其它植物呈现增加趋势。气候变化下，马尾树目前适宜分布的东南部一些区域将不再适宜，新适宜分布区将向西南、北部、西部和东北部一些区域扩展；秦岭冷杉目前适宜分布的东南部和东部一些区域将不再适宜，新适宜分布区将向西南部、西北部和西部一些区域扩展；其它植物目前适宜分布的东部、东南部、南部及东北部一些区域将不再适宜，新适宜分布区将向西部和西南部一些区域扩展。气候变化下，这些植物适宜分布范围与年均气温和降水量变化相关性并不一致，一些植物适宜分布范围与年均气温和降水量变化相关系数不显著。另外，一些植物适宜范围与年降水量和年均气温变化多元线性回归关系决定系数较小。结果说明，气候变化下，目前适宜范围缩小，新适宜范围主要向高海拔扩展，不同植物适宜分布范围与年均气温和年降水量变化的关系不同。

关键词：气候变化；秦岭冷杉；祁连圆柏；楠木；麦吊云杉；马尾树；领春木；连香树；濒危植物
中图分类号：Q 948　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2095-0845(2011)03-335-15

The Potential Effects of Climate Change on the Distributions of Seven Arbors Plants in China

WU Jian-Guo
(*Chinese Research Academy of Environmental Sciences*, Beijing 100012, China)

Abstract: It is crucial to understand rationally the effects of climate change on the distribution of species for the conservation of biodiversity. To conserve effectively plants biodiversity under climate change, the effects of climate change on the distributions of Qinling Fir (*Abies chensiensis*), Qilian Savin (*Sabina przewalskii*), Zhennan (*Phoebe zhennan*), Sergeant Spruce (*Picea brachytyla*), China Horsetailtree (*Rhoiptelea chiliantha*), Manyseeded Euptelea (*Euptelea pleiospermn*) and China Katsuratree (*Cercidiphyllum japonicum*) in China was analyzed using the CART (classification and regression tree) model and climate change scenarios of A2 and B2. The results showed that climate change in China would cause decrease in the current distribution of these plants. It would cause a decrease in the new distribution or total distribution region of China Katsuratree, China Horsetailtree, Zhennan, and Qilian Savin from periods of 1991-2020 to periods of 2081-2100. It would also cause decrease in the new distribution and total distribution region of Qinling Fir from periods of 1991-2020 to periods of 2021-2050 year or a increase from periods of 2051-2100 to periods of 2021-2050 year. It would cause an increase in the new distribution or total distribution region of other plants increase from periods of 1991-2020 year to periods of 2081-2100 year. They were

* 基金项目：国家“十一五”科技支撑专题 (2007BAC03A02-06) 和中国环境科学研究院公益性院所基金项目支持 (2007KYYW05)
收稿日期：2010-10-24，2010-12-08 接受发表
作者简介：吴建国 (1971-) 男，博士，研究员，研究方向为气候变化生态影响及其适应。E-mail：wujg9298@yahoo.com.cn

higher in A2 scenario than that in B2 scenario. Additionally, under climate change, the southeast of current distribution regions of Horsetailtree would reduce. Their new distribution regions would expand towards west, southwest, north or northeast of the current distribution regions. The southeast or east of current distribution regions of Qinling Fir would reduce. Their new distribution regions would expand towards west or northwest or north or southwest of current distribution regions. The northeast, southeast or south or east of current distribution regions of the other plants would reduce. Their new distribution regions of them would expand towards west or southwest of current distribution regions. Changing in current distribution, new distribution or total distribution region of the plants did not consistently change with changing in annual mean temperature or precipitation in China, and some plants were poor related with changing in annual mean temperature or precipitation in China. The linear regression relationship between changing in some plants distribution and annual mean temperature and annual mean precipitation in China were poor. The results indicated that climate change in China would cause changing in spatial distribution pattern of these plants, decrease in current distribution region of them.

Key words: Climate change; Qinling Fir; Qilian Savin; Zhennan; Sergeant Spruce; China Horsetailtree; Many-seeded Euptelea; China Katsuratree; Endangered plant

气候变化已对物种的分布和丰富度产生了极大影响（Parmesan 和 Yehe, 2003；Root 等, 2003），未来将产生更大的影响（Araújo 等, 2005）。为了在气候变化下有效地保护生物多样性，科学认识气候变化对物种分布影响将是关键（Williams 等, 2005；Pyke 等, 2005）。另外，为了科学地规划自然保护区而有效保护物种，准确确定气候变化对物种分布影响也是关键（McCarty, 2001；Coulston 和 Riitters, 2005）。

在国际上，气候变化对植物物种分布影响研究广泛展开，如 Bakkenes 等（2002）分析了气候变化对欧洲高等植物分布的影响；Erasmus 等（2002）分析了气候变化对非洲一些物种分布的影响；Shafer 等（2001）分析了气候变化对南美一些乔木及灌木分布的影响，但多数研究对气候变化下物种在不同年份及多年分布变化差异考虑不够，利用长时间序列气候变化情景分析气候变化对物种分布影响受到广泛关注（Loiselle 等, 2008；IPCC, 2007）。另一方面，选择气候要素差异也较大，如 Erasmus 等（2002）选择年及月均气温、年及月最小最大气温及繁殖期降水量，Forsman 和 Mönkkönen（2003）选择最冷月气温、年均气温、繁殖期气温和降水量，Luoto 等（2005）选择最冷月气温和降水量及大于 5℃ 积温，Matsui 等（2004）和 Midgley 等（2002）根据相关研究选择气候变量分析气候变化对物种分布的影响。气候要素平均状态和极端值对物种分布都有一定影响，每个气候变量只反映了物种与气候要素关系一方面。在我国，气候变化对植物分布影响方面也开展了一些研究（郝占庆等, 2001），但都利用了单一气候变化情景，对气候要素间相互作用或波动性及极端气候事件考虑不够。为了准确地确定气候变化对物种分布的影响，需要利用长时间序列气候变化情景，选择多种气候变量，系统分析气候变化后物种目前适宜、新适宜及总适宜分布区的变化趋势。

秦岭冷杉（*Abies chensiensis* Van Tiegh），松科冷杉属常绿乔木，为特有珍稀濒危植物，国家Ⅱ级保护植物，分布于河南、湖北、陕西和甘肃，分布区年平均温 7.7℃、极端最高温不超过 35℃、极端最低温不低于 −15.3℃、相对湿度不小于 78%、年降水量 1 347 mm，土层较厚、富含腐殖质棕壤土及暗棕壤土；祁连圆柏（*Sabina przewalskii* Kom），属于柏科圆柏属，为我国特有树种，产于青海东部、东北部及北部、甘肃河西走廊及南部、四川北部，耐旱性强；楠木（*Phoebe zhennan* S Lee Et F. N. Wei），别名楠树、雅楠，属樟科楠属，分布于四川、贵州、湖北、湖南，为我国特有植物，属渐危种，适生区气候温暖、湿润、土层深厚疏松、排水良好，为中性或微酸性壤质土壤；麦吊云杉（*Picea brachytyla*（Franch.）Pritz），属于松科冷杉属，为我国特有种，属于国家Ⅱ级保护植物，分布于河南、湖北、陕西、四川、甘肃等地，分布于秦岭、大巴山及四川北部，分布区气候温凉湿润；马尾树（*Rhoiptelea chiliantha* Diels Et Hand.-Mazz.），为马尾树科马尾树属

唯一种，属第三纪孑遗单种产植物，列为国家Ⅱ级保护稀有种，分布于贵州、广西和云南，分布区气候冬无严寒、夏无酷暑、温凉湿润，土壤为黄壤或黄棕壤；领春木（*Cercidiphyllum japonicum* Sieb. Et Zucc），属昆栏树科领春木属树种，为第三纪孑遗植物和稀有珍贵古老树种，对研究古植物区系和古代地理气候有重要学术价值，属国家Ⅲ级保护植物，分布于河北南部、山西东南部、河南西北部、陕西南部、甘肃南部、湖北西部、湖南北部、安徽西部和南部、浙江西北部、江西东部、四川东部和西北部、云南西北部至西南部、贵州南部和西北部等地，分布区年均温 11～15℃、极端最低温可达 -18℃、年降水量 800～1 400 mm，相对湿度不低于 70%，适于土层深厚、富含有机质沙壤土或壤土；连香树（*Cercidiphyllum japonicum* Sieb. Et Zucc），属连香树科连香树属，稀有种，残遗分布于暖温带及亚热带地区，分布于山西、河南、陕西、甘肃等，分布区年均温 10～20℃、年降水量 50～2 000 mm、相对湿度 80%，土壤为棕壤和红黄壤（陈坤浩等，2007；董晓东等，2002；杜晓华和姚连芳，2009；刘美等，2009；龙应霞和郭治友，2008；王建宏等，2006；王世雄等，2009；王煜和刘胜祥，2002；温远光和李信贤，1991；吴甘霖，2006；许林军等，2005；杨礼旦，2003；叶其刚等，2001；袁永明和张志明，1986；张文辉等，2004，2005a，b；周世强等，1997；中国科学院植物研究所，1987；中国植物志编辑委员会，1978-1979，1982，1998）。气候变化对植物分布将有一定影响，但目前对这些影响并不十分清楚。为此，本文采用了两种气候变化情景（包括 A2 和 B2 情景），分析了 1991-2100 年不同时段（1991-2020 年、2021-2050 年、2051-2080 年和 2081-2100 年）7 种植物分布的变化，及其与我国年均气温和降水量变化相关性，希望为气候变化下保护这些植物提供依据，为进一步开展相关研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 植物分布数据的收集与分析

本研究中 7 种植物分布数据主要通过收集整理中国珍稀濒危植物红皮书、植物志、专题报告和公开发表文献等获得（陈坤浩等，2007；董晓东等，2002；杜晓华等，2009；刘美等，2009；龙应霞等，2008；王建宏等，2006；王世雄等，2009；王煜等，2002；温远光等，1991；吴甘霖等，2006；许林军等，2005；杨礼旦，2003；叶其刚等，2001；袁永明等，1986；张文辉等，2004，2005a，b；周世强和黄金燕，1997；中国科学院植物研究所，1987；中国植物志编辑委员会，1978-1979，1982，1998）。将《中国地名录-中华人民共和国地图集地名索引》中三万三千余条地名录入 Excel 表格，将地名、经纬度属性列转换成 DBF 格式后，在地理信息系统 ArcGIS9.2 软件的 ArcMAP 中打开后加载坐标数据并读取坐标数据，然后以数据层方式加载到地图文档中。把植物分布数据在 Access 软件中建立数据库后，利用 ArcGIS9.2 软件将每一种物种分布与否（分布有以 1 表示，分布无以 0 表示）数据作为属性添加到数字化县级行政区划图属性表上，根据这一属性将数字化县级行政区划图插值为 15 770 个 25 km×25 km 栅格单元，制作这些植物分布图，再用栅格化物种分布数据裁剪栅格象元大小相同气候数据，得到 15 770 个 25 km×25 km 象元大小栅格化气候数据，将物种分布栅格数据转化为点数据，根据点 ID 号将每种植物分布属性表链接后输出得到物种分布属性表，将栅格形式气候数据转化为点数据，根据点 ID 号将每一年不同气候变量属性表链接，得到从 1991 至 2100 年气候变量属性表，基于点形式气候数据与点形式的物种分布数据点 ID 号相同使每个点上气候数据与物种分布数据对应，建立全国范围 15 770 个点气候数据与物种分布数据相匹配的数据库，作为分析气候变化对这些植物分布影响的基础数据。

1.2 气候因素选择

在分析气候变化对物种分布影响时，常选择年均气温、夏季和冬季气温、生长季气温、最热及最冷月气温、年降水量及实际和潜在蒸发量等。另外，也常选择干燥指数（谢良若夫干燥指数，伊万若夫干燥指数）、Holdridge 指数（Holdridge，1967；张新时等，1993）、Kira 指数（Kira，1977）和 Thornthwaite 指数（Thornthwaite，1948；张新时等，1993）。基于不同气候要素变量与植物分布关系的复杂性，选用了反映气温、降水量的变量，以及反映气候要素极端趋势的变量，并且也选用干燥指数（谢良若夫干燥指数、修改的谢良若夫干燥指数，伊万若夫干燥指数）、Holdridge 指数、Kira 指数和 Thornthwaite 指数，总计 62 个变量（表 1）。

模拟气候变化对分布影响中，应用过多参数将导致模型分析不稳定（Muňoz 等，2004；Beaumont 等，2005）。PCA（主分量分析）方法利用预测变量产生的主分量子集代替了预测变量本身，并且减少了变量数量、排除了变量间多重共线性问题，故在分析气候变化对物种分布

表1 构建模型的气候变量

Table 1 Climate variables used to construct the model

序号 No.	气候变量 Climatic variable	序号 No.	气候变量 Climatic variable
1	年均气温 Annual mean temperature (℃)	32	春季降水量 Spring precipitation amount (mm)
2	1月平均气温 January mean temperature (℃)	33	夏季降水量 Summer precipitation amount (mm)
3	7月平均气温 July mean temperature (℃)	34	秋季降水量 Autumn precipitation amount (mm)
4	春季平均气温 Spring mean temperature (℃)	35	冬季降水量 Winter precipitation amount (mm)
5	夏季平均气温 Summer mean temperature (℃)	36	春季降水强度 Spring precipitation intensity (mm/d)
6	秋季平均气温 Autumn mean temperature (℃)	37	夏季降水强度 Summer precipitation intensity (mm/d)
7	冬季平均气温 Winter mean temperature (℃)	38	秋季降水强度 autumn precipitation intensity (mm/d)
8	大于0℃积温 Cumulative temperature above 0℃ (℃)	39	冬季降水强度 Winter precipitation intensity (mm/d)
9	大于5℃积温 Cumulative temperature above 5℃ (℃)	40	降水量大于0 mm天数 Cumulative days of precipitation above 0 mm (d)
10	大于10℃积温 Cumulative temperature above 10℃ (℃)	41	降水量大于5 mm天数 Cumulative days of precipitation above 5 mm (d)
11	大于15℃积温 Cumulative temperature above 15℃ (℃)	42	降水量大于10 mm天数 Cumulative days of precipitation above 10 mm (d)
12	大于20℃积温 Cumulative temperature above 20℃ (℃)	43	降水量大于25 mm天数 Cumulative days of precipitation above 25 mm (d)
13	大于25℃积温 Cumulative temperature above 25℃ (℃)	44	降水量大于50 mm天数 Cumulative days of precipitation above 50 mm (d)
14	持续大于0℃天数 Continued days of temperature above 0℃ (d)	45	降水量大于100 mm天数 Cumulative days of precipitation above 100 mm (d)
15	持续大于5℃天数 Continued days of temperature above 5℃ (d)	46	降水量大于150 mm天数 Cumulative days of precipitation above 150 mm (d)
16	持续大于10℃天数 Continued days of temperature above 10℃ (d)	47	最大降水强度 Maximum precipitation intensity (mm/d)
17	持续大于15℃天数 Continued days of temperature above 15℃ (d)	48	最大降水强度天数 Cumulative Days of maximum precipitation intensity (d)
18	持续大于20℃天数 Continued days of temperature above 20℃ (d)	49	暴雨天数 Days of rainstorm (d)
19	持续大于25℃天数 Continued days of temperature above 25℃ (d)	50	①干燥度指数1 Index of aridity *k1*
20	最冷月最低温度 Minimum temperature in the coldest month (℃)	51	②干燥度指数2 Index of aridity *k2*
21	最热月最高温度 Maximum temperature in the hottest month (℃)	52	③干燥度指数3 Index of aridity *k3*
22	最冷月最低温度累积天数 Cumulative days of minimum temperature in the coldest month (d)	53	年均生物学温度 Annual mean bio-temperature BT (℃)
23	最热月最高温度累积天数 Cumulative days of maximum temperature in the hottest month (d)	54	潜在蒸发率 Potential evapotranspiration rate PER
24	持续大于35℃天数 Cumulative days of temperature above 35℃ (d)	55	潜在蒸发量 Potential evapotranspiration PRT (mm)
25	持续低于-10℃累积温度 Cumulative temperature continuing below -10℃ (℃)	56	温暖指数 Warmth index *WI*
26	持续低于-5℃累积温度 Cumulative temperature continuing below -5℃ (℃)	57	寒冷指数 Coldness index *CI*
27	持续低于0℃累积温度 Cumulative temperature continuing below 0℃ (℃)	58	湿度指数 Humidity index *HI*
28	持续低于-10℃累积天数 Cumulative days of temperature continuing below -10℃ (d)	59	潜在蒸发 Potential evapotranspiration *Em*
29	持续低于-5℃累积天数 Cumulative days of temperature continuing below -5℃ (d)	60	湿润指数 Index of humidity I_m
30	持续低于0℃累积天数 Cumulative days of temperature continuing below 0℃ (d)	61	湿润度指数 Index of humidity I_{ay}
31	年降雨量 Annual precipitation amount (mm)	62	干燥度指数 Index of aridity I_{hy}

注：① 干燥度指数k1为谢良若夫干燥度指数；② 干燥度指数k2为修改谢良若夫干燥度指数；③ 干燥度指数k3为伊若夫干燥度指数

Note: ① Index of aridity k1, Xie Lian Ni ruo fu Index of aridity; ② Index of aridity k2, Revised Xie Lian Ni Ruo Fu Index of aridity K_2; ③ Index of aridity k3, Yi Fang Ruo Fu index of aridity

影响中常被用来减少参数数量（Williams 等，2003）。本研究中，考虑到 62 个气候变量过多有自变量共线性问题，也用 PCA 减少参数数量，并根据 PCA 结果，选择占全部变量 99% 的前 22 个主分量作为分析气候变化对物种分布预测变量（表 2）。这些主分量为原 62 个气候要素的函数，每个主分量中各气候要素系数不同，第一主分量系数较高的原变量包括秋季平均气温、大于 0℃和 5℃积温，持续大于 25℃天数，Holdridge 年均生物学温度和潜在蒸发率，第 2 到第 22 主分量系数较高的原变量分别是 Thornthwaite 湿润指数 I_m、春季降水量、干燥度指数 *k2*、最大降水强度、暴雨天数、持续大于 10℃天数、持续大于 15℃天数、Thornthwaite 干燥度指数 I_{hy}、持续大于 20℃天数、持续大于 0℃天数、Holdridge 潜在蒸发量、干燥度指数 *k3*、持续大于 35℃天数、降水量大于 0 mm 天数、降水量大于 5 mm 天数、春季降水强度、秋季降水强度、Thornthwaite 湿润指数 I_{ay}、秋季降水量、夏季降水强度和持续低于 0℃的累积天数。

表 2　占总变量 99%的前 22 个主分量（PC）

Table 2　First 22 PC amount to 99% of the total variance

分量 Component	标准误 Standard deviation	变量比例 Proportion of variance	累积比例 Cumulative proportion
1	5.87	55.60	55.60
2	2.91	13.60	69.20
3	1.83	5.40	74.60
4	1.64	4.30	78.90
5	1.54	3.80	82.70
6	1.32	2.80	85.50
7	1.12	2.00	87.50
8	1.04	1.70	89.30
9	1.00	1.60	90.90
10	0.96	1.50	92.40
11	0.83	1.10	93.50
12	0.78	1.00	94.50
13	0.73	0.90	95.30
14	0.72	0.80	96.20
15	0.68	0.80	96.90
16	0.57	0.50	97.40
17	0.52	0.40	97.90
18	0.45	0.30	98.20
19	0.40	0.30	98.50
20	0.38	0.20	98.70
21	0.35	0.20	98.90
22	0.31	0.20	99.10

1.3　气候变化情景

气候变化分析中，本研究采用 IPCC 排放情景特别报告（SRES）中的 A2 和 B2 情景，这些情景由中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所引进英国 Hadley 气候中心 RCM（Regional Climate Model）系统 PRECIS（Providing Regional Climates for Impacts Studies）气候模型产生（许吟隆等，2002，2005；许吟隆，2005；居辉等，2005）。A2 情景描述了区域经济发展趋势，单个资本经济发展和技术革新比其它情景慢，CO_2 浓度从 2000 年 380 μL·L^{-1} 到 2080 年 700 μL·L^{-1}，全球最高增温幅度为 3.79℃；B2 情景描述了区域社会经济和环境可持续发展，人口持续增加（比 A2 情景低），经济发展中速度，采用不同发展技术，CO_2 浓度从 2000 年 380 μL·L^{-1} 到 2080 年 550 μL·L^{-1}，全球最高增温幅度为 2.69℃；基准情景选择 1961–1990 年气候要素值，基准情景与未来情景都是同一个气候模式产生，模型给出每个格点（中国 4001 个）逐日最高温、最低温、平均温度、降水和辐射等气象指标，这些情景在我国已被检验和应用，包括对基准气候情景（1961–1990 年）与观测值对应检验及模拟分析未来中国气候变化趋势（许吟隆等，2002，2005；许吟隆，2005；居辉等，2005）。为了使气候数据与物种分布数据相统一，利用 Kriging 法将这些气候数据通过插值转化为象元大小为 25 km×25 km 栅格数据。如 1.1 所述，为了与物种分布数据进行匹配，用已栅格化的物种分布数据裁剪同样栅格象元大小一致的气候数据，得到 15 770 个 25 km×25 km 栅格上的气候要素数据。

1.4　模拟方法

CART（classification and regression tree，分类和回归树）模型是广泛用来模拟分析物种分布的生态位模型，也是广泛用来模拟分析气候变化对物种分布影响的方法（Thuiller，2003）。本研究采用这个模型分析气候变化对 7 种植物分布影响，最小节点数选择 10，节点偏差选择 0.010。由于 CART 模型模拟计算出的物种分布信息是以概率形式反映，参考国际上做法，以概率大于 0.5 作为分布存在标准，小于 0.5 作为分布不存在标准（Bakkenes 等，2002；Midgley 等，2003；Berry 等，2002）。

模拟分析中，先根据 7 种植物目前分布范围与部分基准气候情景数据求出模型参数，再利用基准气候情景模拟这些植物在当前气候条件下分布，并与观测分布对比评价模拟效果。同时，通过计算 AUC（the area under the relative operating characteristic curve，相对操作特征曲线下面积）和 Kappa（κ）统计学方法评价模拟准确性（Thuiller，2003）。

分析气候变化对这些植物分布的影响中，先计算了基准气候（1961–1990 年）和不同气候变化情景 1991–2100 年各年代这些植物分布范围，又计算了不同气候变化情景下这些植物在 1991–2020 年、2021–2050 年、2051–2080 年和 2081–2100 年时段分布范围平均值，通

过比较这些植物在基准气候情景（1961－1990 年）与 1991－2020 年、2021－2050 年、2051－2080 年和 2081－2100 年时段分布范围差异，分析气候变化后这些植物分布变化趋势，适宜气候分布范围＝模拟计算未来气候情景适宜分布格点数÷基准情景下适宜分布格点数×100。同时，以相关分析方法分析了这些植物分布范围与年均气温变化和年降水量变化相关性，以多元回归方法分析了这些植物分布范围与年均气温和年降水量变化多元回归关系，以 Durbin Watson 方法检验气候要素长时间序列自相关性，以 Hildreth-Lu 方法消除这些回归关系中自变量之间自相关性（Kutner 等，2004）。我国年均气温变化＝∑(每个格点每年气温－每个格点基准情景下平均气温)÷总格点数；我国年降水量变化＝∑((每个格点每年降水量-每个格点基准情景下年降水)÷每个格点基准情景下年降水量×100)÷总格点数，气温和降水量变化都是计算比较未来情景（1991－2100 年）和基准气候情景（1961－1990 年）得到（图 1）。

2 结果与分析

2.1 模拟效果分析

CART 模型模拟的基准气候情景下这些植物分布与实际观测分布范围接近，CART 模型模拟目前分布范围结果占观测分布范围的 60% 以上。模型检验结果表明模拟的 AUC 为 0.94 以上，Kappa（κ）统计值为 0.65 以上，说明模拟总体上较好（表 3）。

表 3 模型模拟效果检验

Table 3 The assessment of modeling

物种 Species	AUC	效果 Effects	κ	效果 Effects
LXS	0.96	很好 Excellent	0.70	好 Good
LCM	0.94	很好 Excellent	0.65	好 Good
MWS	1.00	很好 Excellent	0.80	好 Good
MDYS	1.00	很好 Excellent	0.78	好 Good
NM	0.99	很好 Excellent	0.77	好 Good
QLYB	1.00	很好 Excellent	0.76	好 Good
QLLS	1.00	很好 Excellent	0.73	好 Good

注：LXS、LCM、MWS、MDYS、NM、QLYB 和 QLLS 分别表示连香树、领春木、马尾树、麦吊云杉、楠木、祁连圆柏和秦岭冷杉. 表 4、5、6 和 7 相同

Note: The LXS、LCM、MWS、MDYS、NM、QLYB and QLLS in table stand for respectively stand for respectively China Katsuratree, Manyseeded Euptelea, China Horsetailtree, Sergeant Spruce, China Horsetailtree, Manyseeded Euptelea, Zhennan, Qilian Savin, Qinling Fir. Same table 4, 5, 6 and 7

2.2 气候变化对植物分布范围的影响

气候变化下，就目前适宜分布范围，这些植物呈现缩小趋势；就新适宜及总适宜分布范围，连香树、马尾树、楠木和祁连圆柏呈现减少趋势，秦岭冷杉在 1991－2020 年及 2021－2050 年时段呈现减少趋势，之后增加，其他植物呈现增加趋势，并且 A2 情景下变化较大，B2 情景下较小（表 4）。

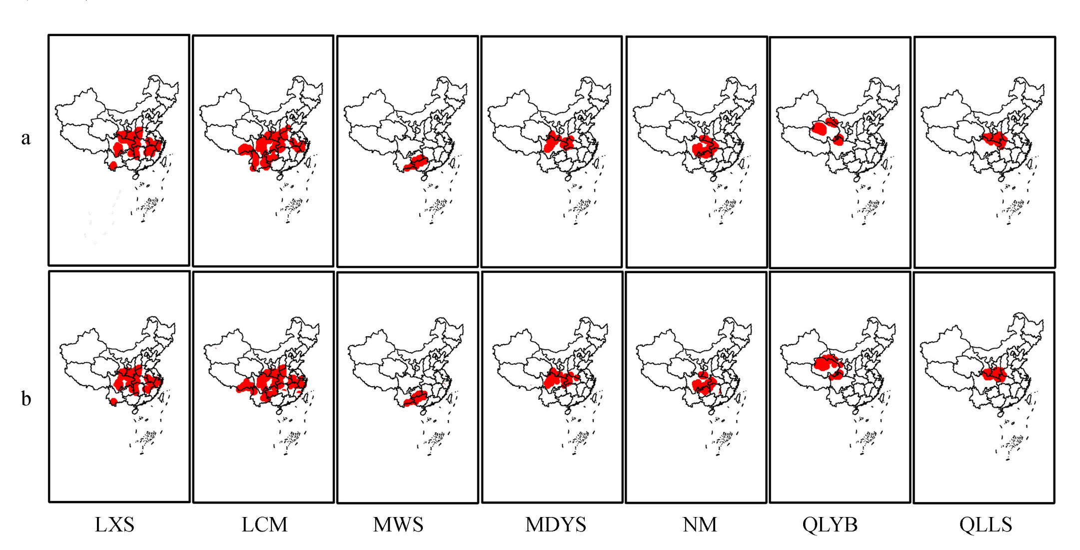


图 1 7 种植物基准（a）和观测分布（b）

图中 LXS、LCM、MWS、MDYS、NM、QLYB 和 QLLS 分别表示连香树、领春木、马尾树、麦吊云杉、楠木、祁连圆柏和秦岭冷杉

Fig. 1 The observed distribution (a) and simulated distribution of 7 plants (b)

The LXS、LCM、MWS、MDYS、NM、QLYB and QLLS in fig stand for respectively stand for respectively China Katsuratree, Manyseeded Euptelea, China Horsetailtree, Sergeant Spruce, China Horsetailtree, Manyseeded Euptelea, Zhennan, Qilian Savin, Qinling Fir

表 4　A2 和 B2 气候变化情景下 7 种植物分布范围

Table 4　The distribution of 7 plants under A2 and B2 climate change scenarios

物种 Species	气候情景 Climate change scenarios	分布 Distribution	观测 Observation (%)	基准情景 Baseline scenarios (%) 1961–1990a	气候变化情景 Future climate change scenarios							
					1991–2020a		2021–2050a		2051–2080a		2081–2100a	
					平均 Mean (%)	标准差 Standard deviations	平均 Mean (%)	标准差 Standard deviations	平均 Mean (%)	标准差 Standard deviations	平均 Mean (%)	标准差 Standard deviations
LXS	A2	MQSY	100	65	24	9	19	9	14	9	9	8
		XSY	0	20	201	68	178	78	169	114	133	65
		ZSY	100	85	225	74	197	84	182	119	142	71
	B2	MQSY	100	65	24	9	18	9	14	8	12	9
		XSY	0	20	203	71	178	76	157	73	139	70
		ZSY	100	85	226	77	196	82	171	78	151	77
LCM	A2	MQSY	100	60	26	6	23	6	18	6	16	5
		XSY	0	22	216	74	230	81	275	93	338	95
		ZSY	100	82	241	77	254	83	293	94	354	98
	B2	MQSY	100	60	26	6	23	6	20	6	17	6
		XSY	0	22	220	75	232	81	253	87	282	98
		ZSY	100	82	246	78	255	83	273	89	300	101
MWS	A2	MQSY	100	83	24	14	13	14	5	7	3	4
		XSY	0	23	1323	604	1246	428	921	292	746	317
		ZSY	100	105	1347	608	1260	427	926	291	749	318
	B2	MQSY	100	83	24	14	12	13	6	7	4	6
		XSY	0	23	1398	574	1246	442	985	355	830	291
		ZSY	100	105	1423	576	1258	440	991	354	834	291
MDYS	A2	MQSY	100	82	5	4	5	4	7	5	10	7
		XSY	0	28	94	54	110	57	156	67	229	88
		ZSY	100	110	99	55	116	58	163	69	239	91
	B2	MQSY	100	82	5	4	6	4	7	6	8	6
		XSY	0	28	98	56	114	57	145	65	188	81
		ZSY	100	110	103	56	120	59	152	68	196	84
NM	A2	MQSY	100	79	16	9	16	9	9	8	3	3
		XSY	0	26	263	125	172	82	113	56	64	40
		ZSY	100	105	279	127	188	88	122	61	67	41
	B2	MQSY	100	79	17	9	16	9	11	8	7	6
		XSY	0	26	237	90	166	81	124	63	90	52
		ZSY	100	105	254	96	182	88	135	69	97	56
QLYB	A2	MQSY	100	74	9	10	5	6	2	1	1	1
		XSY	0	20	85	41	78	37	73	36	65	41
		ZSY	100	94	94	46	82	40	75	36	66	41
	B2	MQSY	100	74	9	10	4	5	2	2	1	1
		XSY	0	20	86	43	77	36	72	36	72	40
		ZSY	100	94	95	48	81	38	74	36	74	40
QLLS	A2	MQSY	100	67	6	5	5	4	4	3	4	3
		XSY	0	17	119	73	100	56	112	70	144	72
		ZSY	100	85	125	75	104	58	116	71	148	74
	B2	MQSY	100	67	6	4	5	4	4	3	3	3
		XSY	0	17	114	72	98	59	107	68	123	62
		ZSY	100	85	120	74	103	61	111	69	126	63

注：MQSY，XSY 和 ZSY 代表目前适宜分布、新适宜分布和总适宜分布，表 5、6 和 7 相同

Note：The MQSY，XSY and ZSY stand for respectively the current distribution，the new suitable distribution or total suitable distribution of plants. Same table 5，6 and 7

气候变化下，就目前适宜分布范围的中位数，麦吊云杉呈现增加趋势，其它植物呈现缩小趋势；就新适宜及总适宜分布范围中位数，连香树、祁连圆柏、马尾树和楠木呈现减少趋势，秦岭冷杉在1991－2020年及2021－2050年时段呈现减少趋势，之后增加，其他植物呈现增加趋势，A2情景下变化较大（表5）。

气候变化下，就目前适宜分布范围最小最大

表5 A2和B2气候情景下7种植物分布范围最小、最大值和中位数

Table 5 The minimal, maximum and median of distribution of 7 plants under A2 and B2 climate change scenarios

物种 Species	气候情景 Climate change scenarios	分布 Distribution	观测 Observation(%)	基准情景 Baseline scenarios (%)	1991－2020a			2021－2050a			2051－2080a			2081－2100a		
					最小 Min	最大 Max	中位数 Median	最小 Min	最大 Max	中位数 Median	最小 Min	最大 Max	中位数 Median	最小 Min	最大 Max	中位数 Median
LXS	A2	MQSY	100	65	6	41	22	2	42	19	2	36	12	0	30	7
		XSY	0	20	66	404	190	68	345	175	28	625	137	36	244	119
		ZSY	100	85	72	436	207	76	378	196	31	637	149	36	270	127
	B2	MQSY	100	65	5	40	21	2	45	17	0	36	13	1	33	10
		XSY	0	20	63	402	189	67	338	164	31	301	140	20	258	136
		ZSY	100	85	67	437	207	80	370	187	35	323	157	22	286	142
LCM	A2	MQSY	100	60	14	34	26	12	33	24	12	38	17	10	30	15
		XSY	0	22	99	387	195	91	384	237	84	421	281	131	502	327
		ZSY	100	82	117	412	226	105	412	263	99	434	301	143	533	341
	B2	MQSY	100	60	11	37	26	12	32	24	13	40	18	11	33	16
		XSY	0	22	98	395	212	95	369	237	71	399	263	90	463	261
		ZSY	100	82	116	420	243	109	395	260	85	424	283	102	496	278
MWS	A2	MQSY	100	83	1	60	23	0	53	9	0	35	3	0	19	0
		XSY	0	23	231	2539	1173	454	2346	1189	501	1669	853	295	1565	678
		ZSY	100	105	233	2558	1192	456	2358	1200	504	1671	857	296	1565	678
	B2	MQSY	100	83	3	60	21	0	50	9	0	34	4	0	29	3
		XSY	0	23	568	2451	1273	450	2436	1171	489	2133	963	358	1518	760
		ZSY	100	105	571	2469	1300	453	2449	1183	491	2139	965	358	1520	763
MDYS	A2	MQSY	100	82	0	16	4	0	16	5	0	22	6	0	28	9
		XSY	0	28	41	267	82	45	230	97	49	287	138	79	391	208
		ZSY	100	110	43	275	86	47	239	100	59	309	144	91	420	225
	B2	MQSY	100	82	0	16	4	0	14	5	0	23	6	1	25	8
		XSY	0	28	33	269	84	42	230	100	54	286	132	48	338	178
		ZSY	100	110	35	278	87	43	243	102	64	309	138	59	359	184
NM	A2	MQSY	100	79	2	32	15	1	40	17	0	30	8	0	7	2
		XSY	0	26	51	611	255	49	367	165	22	234	115	17	161	61
		ZSY	100	105	57	617	269	50	385	180	22	250	127	17	167	65
	B2	MQSY	100	79	0	33	16	1	37	17	0	31	11	0	20	5
		XSY	0	26	47	380	245	42	326	163	31	253	127	22	203	87
		ZSY	100	105	54	401	263	43	347	178	33	272	142	22	223	90
QLYB	A2	MQSY	100	74	0	34	5	0	24	3	0	5	1	0	3	1
		XSY	0	20	18	177	81	15	166	70	24	163	65	16	167	53
		ZSY	100	94	22	203	89	15	185	75	26	163	66	17	168	55
	B2	MQSY	100	74	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0	2	0
		XSY	0	20	15	135	42	17	147	37	15	142	45	18	149	58
		ZSY	100	94	15	136	43	17	147	37	15	143	45	18	149	58
QLLS	A2	MQSY	100	67	0	18	5	0	16	4	0	11	4	0	8	3
		XSY	0	17	28	260	83	37	266	77	33	289	85	42	360	144
		ZSY	100	85	32	272	89	37	277	83	33	292	87	43	366	147
	B2	MQSY	100	67	0	14	5	0	14	4	0	12	4	0	8	3
		XSY	0	17	28	261	81	33	286	71	29	286	87	35	295	113
		ZSY	100	85	29	273	86	34	296	75	29	288	91	37	300	117

值，连香树呈现减少趋势，领春木在 1991–2020 年及 2051–2080 年时段呈现增加趋势，之后下降，楠木最小值变化不大，最大值 1991–2020 年及 2021–2050 年时段呈现增加趋势，之后下降，马尾树、秦岭冷杉和祁连圆柏最小值变化不大，最大值呈现减少趋势，麦吊云杉最小值变化不大，最大值呈现增加趋势；就新适宜及总适宜分布范围最小最大值，连香树最大值呈现减少趋势，最小值在 1991–2020 年及 2021–2050 年时段呈现增加趋势，之后下降，领春木最大值从 1991–2020 年及 2021–2050 年时段呈现下降趋势，之后增加，最小值从 1991–2020 年及 2051–2080 年时段呈现减小趋势，之后增加，马尾树最大值呈现减少趋势，最小值从 1991–2020 年及 2051–2080 年时段呈现增加趋势，之后减小，麦吊云杉最大值从 1991–2020 年及 2021–2050 年时段呈现下降趋势，之后增加，最小值呈现增加的趋势，楠木最小最大值呈现减少趋势，祁连圆柏最小最大值在 1991–2020 年及 2051–2080 年时段呈现下降趋势，之后增加，秦岭冷杉最小值从 1991–2020 年及 2021–2050 年时段呈现增加趋势，从 2021–2050 年及 2051–2080 年时段呈现下降趋势，之后呈现增加，最大值呈现增加趋势，并且 A2 情景下较大，B2 情景下较小（表 5）。

2.3 气候变化下植物空间分布格局的变化

图 1 和图 2 对比分析显示，气候变化下，连香树目前适宜分布区东部和南部的一些区域将不再适宜，新适宜分布区将向西部和西南部一些区域扩展；领春木目前适宜分布区东部和东南部的一些区域将不再适宜，新适宜分布区将向西部和西南部一些区域扩展；马尾树目前适宜分布区东南部的一些区域将不再适宜，新适宜分布区将向西南、北部、西部和东北部多个方向的一些区域扩展；麦吊云杉目前适宜分布区的东部、东北部和东南部及北部一些区域将不再适宜，新适宜分布区将向西南部和西部一些区域扩展；楠木目前适宜分布区东南南部和东部的一些区域将不再适宜，新适宜分布区将向西部和西南部一些区域扩展；祁连圆柏目前适宜分布区的东部、东北部和东南部一些区域将不再适宜，新适宜分布区将向西部和西南部一些区域扩展；秦岭冷杉目前适宜分布区东南部和东部一些区域将不再适宜，新适宜分布区将向西南部、西北部和西部一些区域扩展，并且 A2 情景下变化较大，B2 情景下较小。

2.4 气候变化下植物分布区改变与我国年均气温和降水量变化的关系

表 6 显示，气候变化下，麦吊云杉、领春木和秦岭冷杉目前适宜分布范围与年均气温和年降水量变化呈负相关性，新适宜和总适宜分布范围与年均气温和年降水量变化呈正相关性；祁连圆柏、楠木、马尾树和连香树目前、新适宜和总适宜范围变化与年均气温和年降水量变化呈正相关性，其中 A2 情景下较高，B2 情景下最低。但连香树新适宜与年降水量和温度变化相关系数、麦吊云杉目前适宜分布范围与年降水量和温度变化相关系数、祁连圆柏新适宜和总适宜分布范围与年均气温相关系数、秦岭冷杉新适宜和总适宜分布范围与年降水量和温度变化相关系数都不显著。

7 种植物分布范围变化与我国年均气温变化和年降水量变化多元线性回归关系中，通过 Hildreth-Lu 方法排除了气温和降水变量的自相关性。多元回归关系表明，麦吊云杉、领春木和秦岭冷杉目前适宜分布范围随年均气温和年降水量增加而减少，新适宜和总适宜分布范围随年均气温和年降水量增加而增加；祁连圆柏、楠木、马尾树和连香树目前、新适宜和总适宜分布范围随年均气温和年降水量增加而增加。但连香树、马尾树新适宜与总适宜范围、麦吊云杉目前适宜范围、祁连圆柏和秦岭冷杉目前、新与总适宜与年降水量和年均气温变化的多元线性回归关系决定系数都较小（小于 0.20）（表 7）。

3 讨论

气候变化对不同物种分布范围将产生不同影响，如 Midgley 等（2003）在模拟气候变化对物种分布影响时发现，气候变化下 28 个物种中 5 个适宜分布范围散失、12 个分布范围减少；Petersons 等（2002）模拟发现，气候变化下，28 个物种中 23 个发生迁移、13 个地理范围完全分离；Erasmus 等（2002）模拟发现，气候变化下，南非 17% 的物种范围扩展，78% 的范围缩小，3% 没有反应，2% 局地灭绝。本研究表明，气候变化下，

就目前适宜分布范围，这些植物呈现缩小趋势；就新适宜及总适宜分布范围，连香树、马尾树、楠木和祁连圆柏呈现减少趋势，秦岭冷杉在1991–2020 年及 2021–2050 年时段呈现减少趋势，之后增加，其他植物呈现增加趋势。这可能是因为不同植物目前分布范围不同，气候变化引起

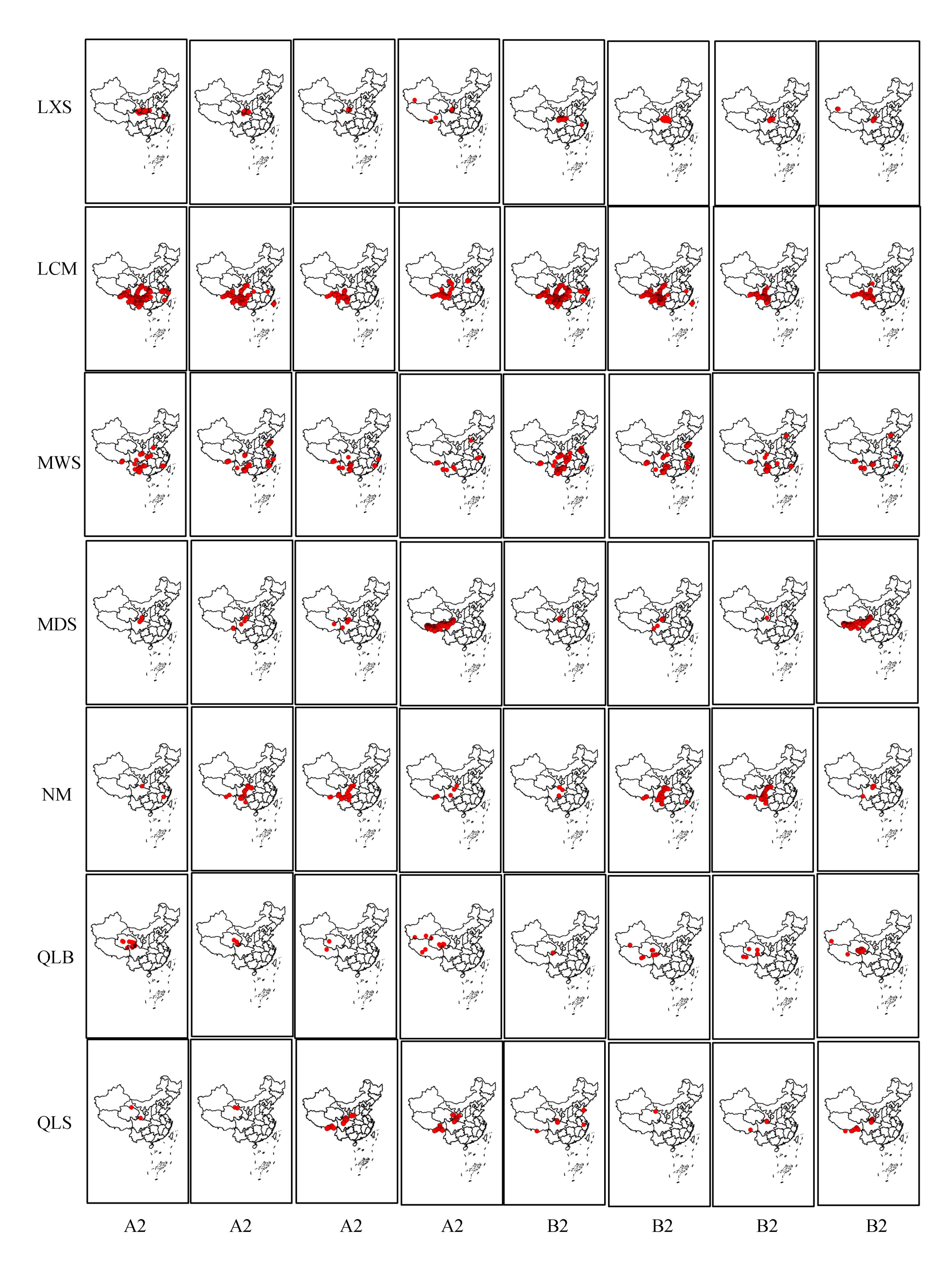


图 2　7 种植物分布范围在 A2 和 B2 气候情景下的变化

图中 LXS、LCM、MWS、MDYS、NM、QLB 和 QLS 分别表示连香树、领春木、马尾树、麦吊云杉、楠木、祁连圆柏和秦岭冷杉

Fig. 2　The changing in distribution of 7 plant species under A2 and B2 climate change scenarios

The LXS、LCM、MWS、MDYS、NM、QLB and QLS in fig stand for respectively stand for respectively China Katsuratree, Manyseeded Euptelea, China Horsetailtree, Sergeant Spruce, China Horsetailtree, Manyseeded Euptelea, Zhennan, Qilian Savin, Qinling Fir

气候要素变化超出植物适应范围使它们目前适宜分布范围一些区域不再适宜。另外，气候变化下不同植物分布特征不同及适应极端气候要素变化不同也可能使它们不再适宜目前适宜分布的一些区域（Woodward，1987）。由于目前温度过低或降水量不适宜或气候综合指标不适宜而限制这些植物分布，而气候变化下这些限制因素改变将可能使这些植物分布范围扩展。当然，气候要素存在空间不均匀性以及受复杂地形的影响，也使这些植物分布范围在气候变化下改变趋势不同。

许多研究表明，气候变化将导致物种向高海拔和高纬度迁移（Midgley 等，2002；Thomas 等，2004），如 Wilson 等（2005）发现平均温度升高 1.3℃，巴西中部 16 个蝴蝶海拔升高 212 m。但不是所有物种都向高海拔和高纬度迁移，Thuiller（2003）发现气候变化后大部分物种都按预期向北发生迁移，但分布在北部物种却例外。Petersons 等（2002）发现，气候变化下在 cape floristic 区域一些物种朝西南和西部方向迁移，Erasmus 等（2002）发现，气候变化下南非动物

表 6　7 种植物分布范围与我国年平均气温和降水量变化相关系数

Table 6　The correlation coefficient between distribution region of 7 plants and the change of annual mean temperature and annual mean precipitation change in China

物种 Species	气候情景 Climate change scenarios	A2 相关系数 Correlation coefficient	A2 *P*	B2 相关系数 Correlation coefficient	B2 *P*	物种 Species	气候情景 Climate change scenarios	A2 相关系数 Correlation coefficient	A2 *P*	B2 相关系数 Correlation coefficient	B2 *P*
		降水变化 Precipitation change						降水变化 Precipitation change			
	MQSY	−0.38	0.00	−0.31	0.00		MQSY	−0.46	0.00	−0.39	0.00
	XSY	−0.18	0.07	−0.19	0.04		XSY	−0.50	0.00	−0.43	0.00
	ZSY	−0.21	0.03	−0.22	0.02		ZSY	−0.52	0.00	−0.45	0.00
LXS		气温变化 Air temperature change				NM		气温变化 Air temperature change			
	MQSY	−0.51	0.00	−0.45	0.00		MQSY	−0.50	0.00	−0.36	0.00
	XSY	−0.18	0.05	−0.16	0.10		XSY	−0.58	0.00	−0.51	0.00
	ZSY	−0.23	0.01	−0.20	0.03		ZSY	−0.60	0.00	−0.52	0.00
		降水变化 Precipitation change						降水变化 Precipitation change			
	MQSY	−0.42	0.00	−0.36	0.00		MQSY	−0.27	0.00	−0.35	0.00
	XSY	0.28	0.00	0.04	0.67		XSY	−0.26	0.01	−0.16	0.10
	ZSY	0.25	0.01	0.01	0.92		ZSY	−0.31	0.00	−0.20	0.03
LCM		气温变化 Air temperature change				QLYB		气温变化 Air temperature change			
	MQSY	−0.63	0.00	−0.59	0.00		MQSY	−0.41	0.00	−0.32	0.00
	XSY	0.56	0.00	0.38	0.00		XSY	−0.05	0.59	−0.03	0.73
	ZSY	0.52	0.00	0.32	0.00		ZSY	−0.14	0.13	−0.08	0.40
		降水变化 Precipitation change						降水变化 Precipitation change			
	MQSY	−0.41	0.00	−0.37	0.00		MQSY	−0.27	0.00	−0.25	0.01
	XSY	−0.28	0.00	−0.26	0.01		XSY	0.16	0.10	0.12	0.20
	ZSY	−0.29	0.00	−0.27	0.00		ZSY	0.13	0.17	0.09	0.32
MWS		气温变化 Air temperature change				QLLS		气温变化 Air temperature change			
	MQSY	−0.62	0.00	−0.63	0.00		MQSY	−0.29	0.00	−0.29	0.00
	XSY	−0.38	0.00	−0.32	0.00		XSY	0.19	0.05	0.09	0.36
	ZSY	−0.39	0.00	−0.34	0.00		ZSY	0.15	0.11	0.06	0.56
		降水变化 Precipitation change									
	MQSY	−0.04	0.66	−0.11	0.24						
	XSY	0.36	0.00	0.19	0.04						
	ZSY	0.35	0.00	0.18	0.06						
MDYS		气温变化 Air temperature change									
	MQSY	0.01	0.94	−0.08	0.43						
	XSY	0.64	0.00	0.53	0.00						
	ZSY	0.62	0.00	0.51	0.00						

表 7　7 种植物分布区范围改变与年均温度改变和年降水量改变多元回归系数

Table 7　The linear regression coefficient between the change of 7 plants distribution and annual mean temperature and annual mean precipitation change in China

物种 Species	气候情景 Climate change scenarios	分布 Distribution	B_0	B_1	B_2	R^2	R^2 调整 Revised R^2	Durbin-Watson
LXS	A2	MQSY	26.55	-0.04	-2.93	0.27	0.25	1.46
	B2	MQSY	27.28	-0.06	-3.30	0.21	0.19	1.43
	A2	XSY	198.88	-0.40	-6.16	0.04	0.02	1.88
	B2	XSY	196.45	-0.67	-4.61	0.04	0.02	1.97
	A2	ZSY	225.43	-0.44	-9.10	0.06	0.04	1.87
	B2	ZSY	223.73	-0.73	-7.91	0.06	0.04	1.94
LCM	A2	MQSY	29.13	-0.01	-2.67	0.39	0.38	1.48
	B2	MQSY	31.23	-0.03	-3.40	0.35	0.34	1.49
	A2	XSY	172.71	-0.71	37.22	0.33	0.32	1.68
	B2	XSY	181.67	-1.14	35.31	0.18	0.16	1.56
	A2	ZSY	201.84	-0.72	34.55	0.28	0.27	1.69
	B2	ZSY	212.90	-1.17	31.91	0.14	0.13	1.58
MWS	A2	MQSY	27.77	0.00	-5.56	0.38	0.37	1.45
	B2	MQSY	31.26	-0.04	-7.27	0.40	0.39	1.60
	A2	XSY	1373.94	-1.45	-95.87	0.14	0.13	2.01
	B2	XSY	1454.79	-3.37	-102.97	0.12	0.10	2.04
	A2	ZSY	1401.71	-1.45	-101.43	0.16	0.14	2.02
	B2	ZSY	1486.05	-3.41	-110.24	0.13	0.11	2.05
MDYS	A2	MQSY	7.25	-0.03	0.31	0.00	-0.01	1.28
	B2	MQSY	8.48	-0.05	-0.15	0.01	-0.01	1.32
	A2	XSY	59.64	-0.38	32.69	0.41	0.40	1.75
	B2	XSY	60.21	-0.50	33.83	0.29	0.28	1.89
	A2	ZSY	66.89	-0.41	33.00	0.39	0.38	1.76
	B2	ZSY	68.69	-0.55	33.67	0.27	0.26	1.92
NM	A2	MQSY	21.57	-0.12	-2.24	0.28	0.26	1.76
	B2	MQSY	22.24	-0.17	-1.92	0.19	0.17	1.79
	A2	XSY	264.58	-1.11	-28.42	0.36	0.35	2.14
	B2	XSY	254.45	-1.20	-28.43	0.30	0.28	2.11
	A2	ZSY	286.15	-1.23	-30.66	0.39	0.38	2.17
	B2	ZSY	276.69	-1.38	-30.35	0.31	0.30	2.14
QLYB	A2	MQSY	11.12	0.00	-2.24	0.17	0.15	1.49
	B2	MQSY	8.95	-0.09	-0.98	0.15	0.13	1.71
	A2	XSY	81.27	-0.74	4.70	0.09	0.08	2.26
	B2	XSY	81.13	-0.44	2.26	0.03	0.01	2.45
	A2	ZSY	92.39	-0.74	2.46	0.10	0.08	2.24
	B2	ZSY	90.09	-0.53	1.28	0.04	0.02	2.34
QLLS	A2	MQSY	8.54	-0.04	-0.84	0.10	0.08	1.18
	B2	MQSY	9.25	-0.05	-1.21	0.10	0.08	1.12
	A2	XSY	94.61	0.21	5.73	0.04	0.02	1.73
	B2	XSY	95.93	0.40	1.60	0.02	0.00	1.69
	A2	ZSY	103.15	0.17	4.89	0.03	0.01	1.74
	B2	ZSY	105.17	0.34	0.39	0.01	-0.01	1.71

B_0 = 常数，B_1 = 年降水量变化，B_2 = 年均气温变化，R^2 = 决定系数

B_0 = constant，B_1 = annual precipitation，B_2 = annual mean air temperature，R^2 = determine coefficient

将主要朝西移动，Shafer 等（2001）发现，气候变化下物种朝多个方向迁移。本研究表明，气候变化下，马尾树目前适宜分布区东南部一些区域将不再适宜，新适宜分布区将向西部、西南、北部和东北部多个方向的一些区域扩展，秦岭冷杉将向西南部、西北部和西部一些区域扩展，其它植物将向西部和西南部一些区域扩展。气候变化下植物分布格局改变主要原因也可能因为目前适

宜区气候要素存在空间差异及气候变化空间差异，以及气候变化下降雨量和热量分布格局的改变。当然，观测分布范围记录不准确而导致在基准情景下分布过小或插值造成误差也可能使结果有一定误差。

许多研究关注全球年均气温变化与物种分布的关系。Hitz 和 Smith（2004）发现全球温度增加 3℃，一半自然保护区将不能支持它原有保护目标，特别是对保护物种影响较大；Leemans 和 Eickhout（2004）发现全球温度增加 1 ~ 2℃，许多物种适应气候变化能力将非常有限。本研究表明，气候变化下，所选植物适宜分布范围与年均气温和降水量变化相关性并不一致，一些适宜分布范围与年均气温和降水量变化相关系数并不显著。另外，气候变化下，连香树、马尾树新适宜与总适宜范围、麦吊云杉目前适宜范围、祁连圆柏和秦岭冷杉目前、新适宜与总适宜与年降水量和年均气温变化的多元线性回归关系决定系数都较小（小于 0.20）。说明气候变化下这些植物分布范围与年均气温和年降水量变化关系可能是非线性复杂关系，这些植物分布范围改变可能与其它气候要素密切相关。意味着以区域年均气温或降水量分析气候变化对植物分布影响将可能有很大不确定性。

需要指出的是，影响植物分布因素很多，但本研究分析气候变化对植物分布影响，实际上反映了气候变化下这些植物适宜的气候分布范围的变化，这是气候变化下植物分布范围改变的前提。另外，本研究中植物分布格点分辨率还较粗，没有考虑土地利用变化和土壤、地下水位及动植物间关系和迁移的影响，也没有充分精细分析小地形的影响。如果考虑土壤因素和小地形的限制，可以推断气候变化下这些植物分布范围减小幅度更大，新适宜分布范围将更小。同时，由于这些植物分布比较复杂，本研究收集有关植物分布数据还可能不是非常全面准确，并且气候变化情景具有不确定性及用 GIS 软件进行气候要素和物种分布数据插值时产生误差等，使研究结果可能存在一定的误差和不确定性，这需要进一步改进完善。虽然如此，在目前认识和技术条件下，本研究探索了气候变化下这些植物分布变化趋势，研究结果反映了气候变化下这些植物分布变化的一些趋势，对气候变化下这些植物的保护仍旧有一定的参考意义。

4 结论

（1）气候变化下，就目前适宜分布范围，这些植物呈现缩小趋势；就新适宜及总适宜分布范围，连香树、马尾树、楠木和祁连圆柏呈现减少趋势，秦岭冷杉在 1991-2020 年及 2021-2050 年时段呈现减少趋势，之后增加，其他植物呈现增加趋势。

（2）气候变化下，马尾树将向西南、北部、西部和东北部多个方向的一些区域扩展，秦岭冷杉将向西南部、西北部和西部一些区域扩展，其它植物将向西部和西南部一些区域扩展。

（3）气候变化下，这些植物适宜分布范围与年均气温和降水量变化相关性并不一致，一些植物适宜分布范围与年均气温和降水量变化相关系数并不显著。不同植物分布范围变化与年降水量和年均气温变化的多元线性回归关系不同，一些植物分布范围变化与年降水量和年均气温变化的多元线性回归关系较弱。

〔参 考 文 献〕

中国科学院植物研究所，1987. 中国珍稀濒危植物［M］. 上海：上海教育出版社，28—29，98—99，180—181

中国植物志编辑委员会，1978. 中国植物志 第 7 卷［M］. 北京：科学出版社，68—69，162—163，375—376

中国植物志编辑委员会，1979. 中国植物志 第 27 卷［M］. 北京：科学出版社，19—20，23—24

中国植物志编辑委员会，1982. 中国植物志 第 31 卷［M］. 北京：科学出版社，113—114

中国植物志编辑委员会，1998. 中国植物志 第 22 卷［M］. 北京：科学出版社，414—415

Araújo MB，Pearson RG，Thuiller W *et al.*，2005. Validation of species-climate impacts models under climate change［J］. *Global Change Biology*，**11**：1504—1513

Bakkenes M，Alkemade JRM，Ihle F *et al.*，2002. Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050［J］. *Global Change Biology*，**8**：390—407

Beaumont LJ，Hughes L，Poulsen M，2005. Predicting species distributions：use of climatic parameters in bioclim and its impacts on prediction of species current and future distribution［J］. *Ecological Modelling*，**186**：250—269

Berry PM, Dawson TP, Harrison PA *et al.*, 2002. Modelling potential impacts of climate change on the bioclimatic envelope of species in Britain and Ireland [J]. *Global Ecology & Biogeography*, **11**: 453—462

Chen KH (陈坤浩), Luo Q (骆强), Xie YG (谢永贵) *et al.*, 2007. *Euptelea pleiospermum* community characteristic of dafang karst area In Guizhou, Southwest China [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research* (武汉植物学研究), **25** (5): 515—520

Coulston J, Riitters KH, 2005. Preserving biodiversity under current and future climates: a case study [J]. *Global Ecology and Biogeography*, **14**: 31—38

Dong XD (董晓东), Xu CD (徐成东), Li JH (李继红), 2002. The geographic distribution and floristic features of the rare endangered in the Cangshan [J]. *Journal of Chuxiongnormal University* (楚雄师范学院学报), **17** (6): 36—38

Du XH (杜晓华), Yao LF (姚连芳), 2009. Progress in rare and endangered plant—*Cercidiphyllum japonicum* [J]. *Journal of Henan Institute of Science and Technology* (河南科技学院学报), **37** (2): 19—26

Erasmus BFN, Vanjaarsveld SA, Chown LS *et al.*, 2002. Vulnerability of south African animal taxa to climate change [J]. *Global Change Biology*, **8**: 679—693

Forsman JT, Mönkkönen M, 2003. The role of climate in limiting European resident bird populations [J]. *Journal of Biogeography*, **30**: 55—70

Hao ZQ (郝占庆), Dai LM (代力民), He HS (贺红士), 2001. Potential response of major tree species to climate warming in Changbai Mountain, Northeast China [J]. *Chinese Journal Applied Ecology* (应用生态学报), **12** (5): 653—658

Hitz S, Smith J, 2004. Estimating global impacts from climate change [J]. *Global Environmental Change*, **14**: 201—218

Holdridge LR, 1967. *Life Zone Ecology* [M]. Costa Rica: Tropical Science Center and Jose, 206

Iverson LR, Prasad AM, 2001. Potential change in tree species richness and forest community types following climate change [J]. *Ecosystem*, **4**: 186—199

Ju H (居辉), Xiong W (熊伟), Xu YL (许吟隆) *et al.*, 2005. Impacts of climate change on wheat yield in China [J]. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), **31** (10): 1340—1343

Kira TA, 1977. Climatologically interpretation of Japanese vegetation zones [A]. In: Miyawaki A, Tüxen R eds. *Vegetation Science and Environmental Protection* [M]. Tokyo: Maruzen, 21—30, JP

Kutner MH, Nachtsheim CJ, Neter J, 2004. *Applied linear regression models*, 4th edn [M]. New York: Mcgraw-Hill Companies, Inc, 492—501, USA

Leemans R, Eickhout B, 2004. Another reasons for concern: regional and global impacts on ecosystem for different levels of climate change [J]. *Global Environmental Changes*, **14**: 219—228

Liu M (刘美), Tong YY (童雅賓), Li YX (黎云祥) *et al.*, 2009. Research advance in *Cercidiphyllum japonicum* [J]. *Sichuan Forestry Exploration and Design* (四川林勘设计), **3**: 18—22, 24

Long YX (龙应霞), Guo ZY (郭治友), 2008. Researches on the status of the distribution of the wild *Rhoiptelea chilianthadieis* Ethang-Mazz in Duyun city and the protection strategies [J]. *Qiannan Normal College for Nationality* (黔南民族师范学院学报), **3**: 62—64

Loiselle BA, Jørgensen PM, Consiglio T *et al.*, 2008. Predicting species distributions from herbarium collections: does climate bias in collection sampling influence model outcomes? [J]. *Journal of Biogeography*, **35**: 105-116

Luoto M, Pöyry J, Heikkinen RK *et al.*, 2005. Uncertainty of bioclimatic envelope models based on the geographical distribution of species [J]. *Global Ecology and Biogeography*, **14**: 575—584

Matsui T, Tsutomu Y, Tomoki N *et al.*, 2004. Probability distributions, vulnerability and sensitivity in fagus crenata forests following predicted climate changes in Japan [J]. *Journal of Vegetation Sciences*, **15**: 605—614

McCarty JP, 2001. Ecological consequences of recent climate change [J]. *Conservation Biology*, **15**: 320—331

Midgley GF, Hannah L, Millar D *et al.*, 2002. Assessing the vulnerability of species richness to anthropogenic climate change in a biodiversity hotspot [J]. *Global Ecology & Biogeography*, **11**: 445—451

Midgley GF, Hannah L, Millar D *et al.*, 2003. Developing regional and species-level assessment of climate change impacts on biodiversity in the cape floristic region [J] . *Biological Conservation*, **112**: 87—97

Muňoz J, FelíCisimo ÁM, 2004. Comparison of statistical methods commonly used in predictive modeling [J]. *Journal of Vegetation Science*, **15**: 285—292

Parmesan C, Yehe G, 2003. Globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. *Nature*, **421**: 37—42

Peterson AT, Ortega-Huerta MA, Bartley J *et al.*, 2002. Future projections for Mexican fauns under climate change scenarios [J]. *Nature*, **416**: 626—629

Pyke CR, Andelman SJ, Midgley G, 2005. Identifying priority areas for bioclimatic representation under climate change: a case study for proteaceae in the cape floristic region, south Africa [J]. *Biological Conservation*, **125**: 1—9

Root TL, Price JT, Hall KR *et al.*, 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants [J]. *Nature*, **421**: 57—60

Shafer SL, Bartlein PJ, Thompson RS, 2001. Potential changes in the distribution of western north America tree and shrub taxa under future climate scenarios [J]. *Ecosystems*, **4**: 209—215

The Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC), 2007. Technical Summary. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*

［M］. Cambridge, New York: Cambridge University Press

Thomas CD, Cameron A, Green RE *et al*., 2004. Extinction risk from climate change［J］. *Nature*, **427**: 145—148

Thornthwaite CW, 1948. An approach toward a rational classification of climate［J］. *Geographical Review*, **38**: 57—94

Thuiller W, 2003. Biomod-optimizing predictions of species distribution and projecting potential future shifts under global change［J］. *Global Change Biology*, **9**: 1353—1362

Walther GR, Post E, Convey P *et al*., 2002. Ecological response to recent climate change［J］. *Nature*, **416**: 389—395

Wang JH（王建宏）, Xu R（许闰）, Wu JC（吴俊成）*et al*., 2006. A primary study on altitudinal pattern, type of of *Picea brachytyla* formation in Baishuijiang Nature Reserve［J］. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*（甘肃林业科技）, **31**（4）: 10—13

Wang SX（王世雄）, Wang XA（王孝安）, Li GQ（李国庆）*et al*., 2009. Multivariate analysis and environmental interpretation for *Larix chinensis* communities［J］. *Journal of Shaanxi Normal University*（Natural Science Edition）（陕西师范大学学报（自然科学版））, **37**（1）: 69—73

Wang Y（王煜）, Liu SX（刘胜祥）, 2002. Study on the natural population dynamics of *Cercidiphyllum japonicum* in Hubei［J］. *Journal of Central China Normal University*（Natural Science Edition）（华中师范大学学报（自然科学版））, **36**（2）: 93—95

Wen YG（温远光）, Li XX（李信贤）, 1991. the ecological investigation on forest vegetation on the south slope of laoshan mountain in tianlini the main forest vegetation types and their distribution［J］. *Journal of Guangxi Agriculture College*（广西农学院学报）, **10**（4）: 40—51

Williams P, Hannah L, Andelman S *et al*., 2005. Planning for climate change: identifying minimum-dispersal corridors for the cape proteaceae［J］. *Conservation Biology*, **19**（4）: 1063—1074

Williams SE, Bolitho EE, Fox S, 2003. Climate change in Australian tropical rainforests: an impending environmental catastrophe［J］. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **270**: 1887—1892

Wilson RJ, GutiÉRrez D, GutiÉRrez J *et al*., 2005. Change to the elevation limits and extent of species ranges associated with climate change［J］. *Ecology Letters*, **8**: 1138—1146

Woodward FI, 1987. *Climate and Plant Distribution*［M］. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 62—63

Wu GL（吴甘霖）, 2006. The biological features and conservation of *Cercidiphyllum japonicum* Sieb. et Zucc［J］. *Journal of Anqing Teachers College*（Natural Science Edition）（安庆师范学院学报）, **12**（6）: 106—119

Xu LJ（许林军）, Peng H（彭鸿）, Chen CG（陈存根）*et al*., 2005. Quantitative analysis of the *Larix chinensis* Forest's distributionat Qinling Mountains and the character of the alpine timberline at Taibai Mountain［J］. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*（西北植物学报）, **25**（5）: 968—972

Xu YL（许吟隆）, Huang YQ（黄莺翘）, Zhang Y（张勇）*et al*., 2005. Statistical analyses of climate change scenarios over China in the 21st century［J］. *Advance Climate Change Research*（气候变化进展）, **1**（2）: 80—83

Xu YL（许吟隆）, Xue F（薛峰）, Lin YH（林一骅）, 2002. Changes of surface air temperature and precipitation in China during the 21st century simulated by HadCM2 under different greenhouse gas emission scenarios［J］. *Climatic & Environment Research*（气候与环境研究）, **8**（2）: 207—217

Xu YL（许吟隆）, 2005. Analyses on scenario simulations of the 21st century climate change in China［J］. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*（南京气象学院学报）, **28**（3）: 323—329

Yang LD（杨礼旦）, 2003. The phytocoenological features of the *Rhoiptelea chiliantha* community in Nangong, Taijiang County, Guizhou Province［J］. *Journal of Plant Resources and Environment*（植物资源与环境学报）, **12**（2）: 46—51

Ye QG（叶其刚）, Chen SS（陈树森）, Wang SY（王诗云）, 2001. Structure characteristics of a typical community of the rare and endangered plants of houhe nature reserve in the Southwest Hubei［J］. *Journal of Wuhan Botanical Research*（武汉植物学研究）, **19**（3）: 241—247

Yuan YM（袁永明）, Zhang ZY（张志英）, 1986. The precious rare and endemic plants in Qinling Mountains and their floristic characteristics［J］. *Journal of Wuhan Botanical Research*（武汉植物学研究）, **4**（4）: 353—362

Zhang WH（张文辉）, Xu XB（许晓波）, Zhou JY（周建云）*et al*., 2004. Distribution and bioecological characteristics of *Abies chensiensis*, an endangered plant［J］. *Biodiversity Science*（生物多样性）, **12**（4）: 419—426

Zhang WH（张文辉）, Xu XB（许晓波）, Zhou JY（周建云）*et al*., 2005a. Pattern and dynamics of the spatial population distribution of endangered *Abies chensiensis*［J］. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*（西北植物学报）, **25**: 1840—1847

Zhang WH（张文辉）, Xu XB（许晓波）, Zhou JY（周建云）*et al*., 2005b. Population dynamics of endangered plant species *Abies chensiensis*［J］. *Chinese Journal of Applied Ecology*（应用生态学报）, **16**（10）: 1799—1804

Zhang XS（张新时）, Yang DA（杨奠安）, Ni WG（倪文革）, 1993. The potential evapotranspiration（PE）index for vegetation and vegetation-climatic classification（Ⅲ）-An introduction of main methods and PEP program［J］. *Acta Phytoecologica et Gebotanica Sinica*（植物生态学与地植物学学报）, **17**（2）: 97—109

Zhou SQ（周世强）, Huang JY（黄金燕）, 1997. A preliminary study on the population structure and spatial pattern of *Picea brachytyla*［J］. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*（四川林业科技）, **18**（4）: 18—23